

# ER 인서트를 이용한 Hull Mount 에서의 진동저감에 관한 연구

## Vibration reduction in a Hull mount using the ER inserts

김지선\*·김재환\*\*·최승복\*\*·김경수\*\*\*

Ji-Seon Kim, Jae-Hwan Kim, Seung-Bok Choi and Kung-Su Kim

**Key Words :** ER Fluids(ER 유체), Vibration reduction(진동저감), ER insert(ER 인서트)

### ABSTRACT

This paper deals with the vibration reduction of hull mount system of ship structures brought by ER smart structures. The hull mount is used to isolate the vibration of equipment from the host structures. Utilizing the tunable characteristics of ER fluids, ER inserts are made in the hull mount structure. Different types of ER inserts are proposed and the vibration characteristics are investigated. A hull mount structure is made and the influence of ER inserts are experimentally studied. An extensive modal test is empirically conducted to identify natural frequencies and mode shapes according to the applied electric field and the types of ER insert. The frequency tunable characteristics of ER inserts can be applied to many mounting structures for vibration reduction.

### ———— 기호설명 ————

- $\tau$  : 전단응력
- $\dot{\gamma}$  : 전단율
- $G^*$  : 복소전단강성계수
- $G'$  : 저장 탄성률
- $G''$  : 손실 탄성률

## 1. 서론

구조물에서 발생하는 진동은 일반적으로 파동의 전파에 의한 현상으로 볼 수 있는데 이러한 진동은 대체적으로 구조물의 성능을 저하시키거나 파괴하는 원인이 되기도 한다. 특히, 수중 폭발에 의하여 발생하는 파동은 고온, 고압의 맥동 가스 거품과 높은 에너지를 갖는 압축성 유동을 발생시켜 선체 구조물 또는 탑재장비에 치명적인 손실을 입히게 된다.<sup>(1)</sup> 일반적으로 이러한 피해를 줄이기 위해서 1980 년대 중반 이후 함정 및 탑재장비 mounting 시스템의 내충격 설계 및 해석에 의해 수동적인 대처 방안을 많이 택하여 왔으나, 지금까지는 국내의 충격시험 경험 및 설계 기술이 미

비한 실정이다.<sup>(1)</sup>

지능구조물은 주위의 환경의 변화를 감지하여 이에 대처하는 거동을 하는 구조물로서 감지기와 작동기 그리고 적절한 제어가 구조물과 통합화된 시스템이다. 지능재료는 압전재료, 형상기억합금, 자기변형재료, EAP(Electro-active polymer), 전기 유동유체(Electrorheological fluid)<sup>(2)</sup> 등으로 나눌 수 있으며, 이러한 지능재료는 구조물에 적절히 장착되어 외부신호에 따른 제어가 가능하다. 따라서 지능 구조물을 사용하여 수중폭발로 인한 선체 구조물의 충격 전달을 차단 또는 감쇄할 수 있다.

본 연구에서는 Hull mount 에 전달되는 진동을 ER 유체를 적용한 ER insert 를 이용하여 저감 할 수 있는지를 실험을 통하여 검증하고자 한다. 이러한 연구를 통하여 향후 선체 및 수중구조물의 Hull mount 에서 능동적인 진동저감 기술이 발전하게 될 것이다.

## 2. ER 유체의 일반적 특성

ER 유체는 전기장 무부하시 비전도성 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하는 뉴턴 유체와 같은 거동을 나타내지만 전기장 부하시 항복응력을 갖는 빙햄 거동(Bingham behavior)을 나타내게 된다. 비전도성 용매에 분산된 입자는 용매와 다른 투과율을 갖고 있어 외부에서 부하되는 전기장에 따라 입자에 분극이 발생되어 국부적으로 다른 전기장을 형성하게 된다. 분극이 발생하는 입자는

---

\* 인하대학교 기계공학과 대학원  
 \*\* 정회원, 인하대학교 기계공학과  
 E-mail : jaehwan@inha.ac.kr  
 Tel : (032)872-7925, Fax : (032) 868-1716  
 \*\*\* 인하대학교 선박해양공학과

서로 체인을 형성하고 이 체인 구조는 입자들의 결합력에 의해 외부로부터 가해지는 전단력에 대해 저항을 갖게 되고 유체의 유동을 제한할 수 있게 된다. 일반적인 ER의 물리적특성과 기계적성질은 Fig.1 과 같이 ER 물질(material) 거동(behavior) 연구를 기초로함으로써 rheological 범위에서 ER fluids 는 pre-yield, yield 그리고 post-yield 이렇게 3부분으로 나누어진다. ER 유체가 yield region 에서 비선형 점탄성(nonlinear viscoelastic) 물질과 the post-yield 에서 소성(plastic) 물질과 같이 거동하는 동안 pre-yield 에서는 선형의 점탄성 물질과 같이 거동한다.

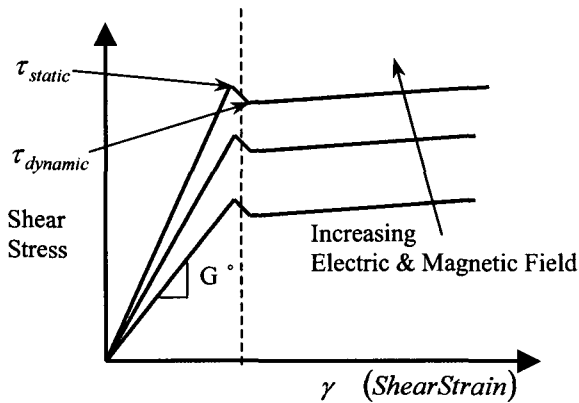


Fig 1. Pre and Post-yield regions of ER fluid

본 연구의 ER insert 와 같이 흐름이 없고 전단응력이 항복전단응력 하에 있는 유체는 식 (1)와 같이 점탄성 거동을 보인다.

$$\tau = G^* \gamma, \quad \tau \leq \tau_y \quad (1)$$

여기서  $G^*$  는 복소 전단 강성계수이며 이는 식 (2)와 같이 에너지 저장능력을 나타내는 탄성 성분인  $G'$  (storage modulus)와 에너지 감쇠를 나타내는 점성성분인  $G''$  (loss modulus)로 표현된다.

$$G^* = G' + iG'' \quad (2)$$

### 3. Hull mount system 과 ER insert

#### 3.1 Hull mount System

Hull 구조물은 함정이나 항공기 동체와 같은 표면의 구조물을 의미한다. Hull 마운트는 Hull 구조

물에 가벼운 각종 장비를 설치하기 위한 마운트로서 이런 구조물에 외압이 발생하게 되면 치명적인 구조 파괴나 탑재 장비의 기능 손실을 일으키게 된다. Hull 구조물을 실험으로 구현하기 위하여 Fig 2.과 같이 제작하였다. 알루미늄판재로 만든 본 hull 구조물은 수중 물수체를 의미 할 수도 있고, 선체 구조물을 나타낼 수도 있다. 또한 Hull Structure 는 탄성체 이므로 탄성 공진모드를 가지고 있어 이에 따른 거시적 거동이 발생한다. 뿐만 아니라 수중 폭발로 인한 충격파는 고주파의 미시적인 거동을 일으키게 된다.

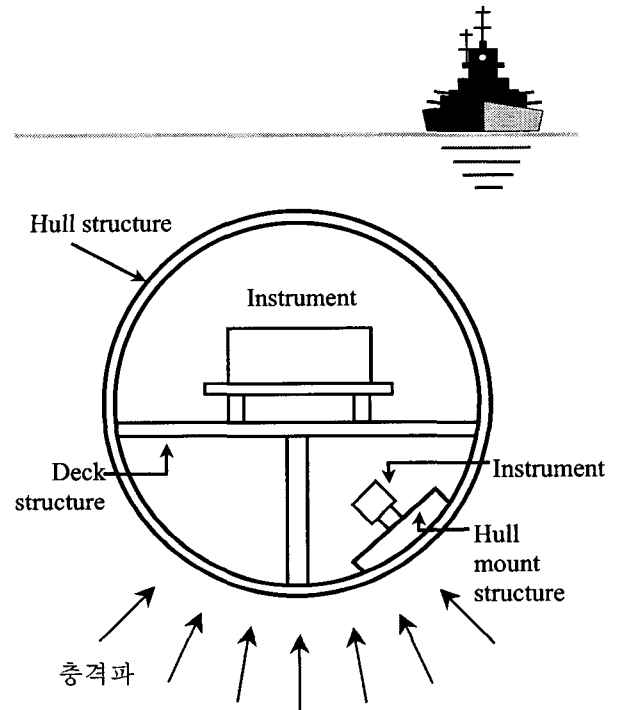


Fig 2. Photograph of the Hull Structure

#### 3.2 ER Insert

Hull mount 구조물 내의 진동 저감을 위하여 ER insert 의 형상을 Fig.3 과 같이 알루미늄 판을 제작하였다. 현재까지 ER insert 의 여러 형상에 대한 진동 또는 충격에 대한 연구가 없었다. 판의 외곽 크기는 140 mm × 140 mm 이며, 두께는 1.5mm 이다. 기본 알루미늄 판에 여러 모형의 ER 인서트를 삽입하였다. ER 유체는 두개의 평판사이에 채워져 있으며 기본 plate 를 절연시킨 뒤 유실을 방지하기 위해서 기본 plate 와 위 아래 두개의 평판을 Epoxy 로 접착 시켰다. 알루미늄 평판은 ER 유체에 독립적으로 서로 다른 전기장을 부하하기 위한

전극(Electrode) 역할을 한다. ER 인서트에 전기장을 인가함으로써 ER 유체에 체인을 형성시켜 구조물을 타고 전파되는 진동 및 충격파를 저감하고자 한다. 알루미늄 판의 ER 유체가 삽입되는 면적과 위치에 변화를 주어 진동 저감의 성능을 비교하고자 하였다. ER 유체는 특수화학 처리한 스타치 입자와 실리콘 오일을 사용하였다. Fig.3 과 4 는 각각 ER 인서트의 여러 타입의 개략도와 사진을 나타낸다.

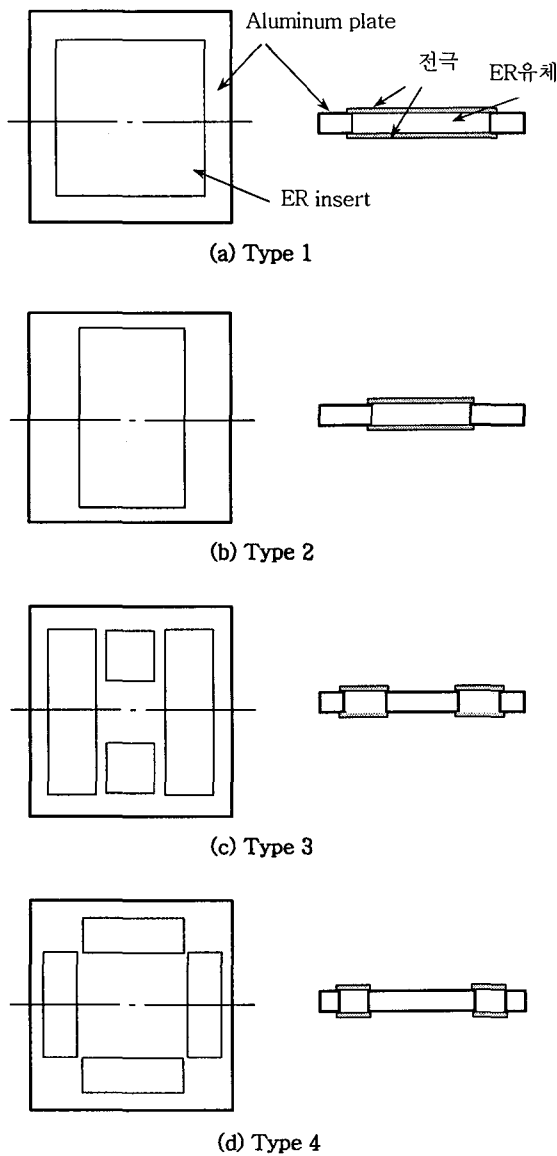


Fig 3. Schematics of ER inserts

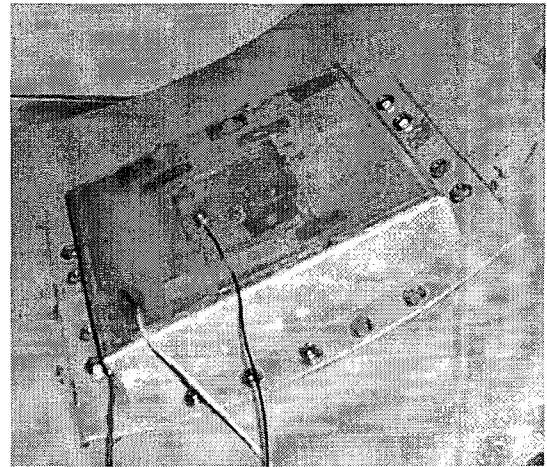


Fig 4. Photograph of the ER insert Plate

#### 4. 실험 장치 및 방법

Fig. 2 와 같은 hull 구조물을 제작하여 hull mount 구조물에 ER insert 를 Fig. 3 와 같이 여러 형태로 제작하여 설치하였다. Hull 구조물은 로프로 매달아 고정하였으며 외부의 진동 및 충격파 전달을 묘사하려 가진기로 hull 구조물하부를 가진하였다. 가진은 구조물의 정 중앙 아래부분에서 가진기(shaker)를 이용하여 구현하였다. 외부 가진이 Hull Structure 에 가해지게 되면서 진동이 발생되고 이 진동은 선체 구조물 내부의 시스템에 영향을 주게 된다.

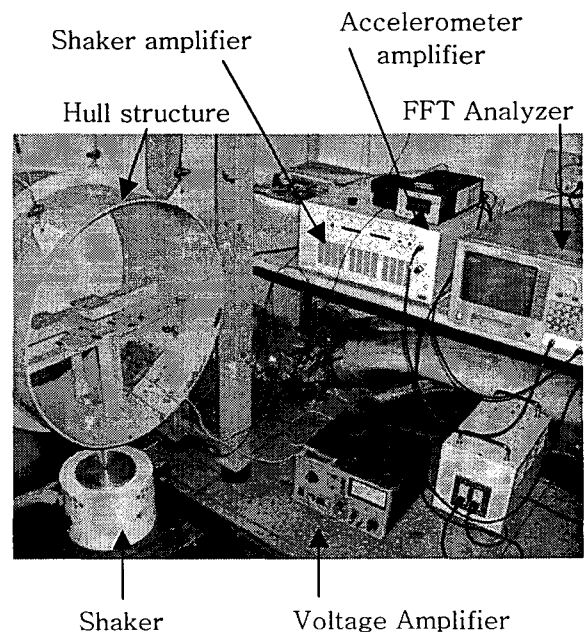


Fig 5. Photograph of experimental set up

가진 입력은 2 채널 주파수 분석기(FFT Analyzer)의 근원 신호를 앰프를 거쳐 가진기(shaker)에 입력하여 랜덤 가진을 실시하였다. 주파수 응답을 얻기 위해 랜덤 가진 입력과 출력은 각각 가속도계(accelerometer)를 이용하여 측정하였으며, 입력 측정 부위는 Hull Structure 의 정 중앙 아래에 가진이 입력되는 부위의 가속도를 측정하였다. ER insert 가 장착된 hull mount 구조물의 거동을 보기 위하여 모드실험을 수행하였다. Hull mount 상부판에 81 개 지점의 가속도를 측정하였다. 모드 시험은 0 kV/mm, 1kV/mm, 2kV/mm 의 전기장을 ER insert plate 에 가하여 그에 따른 주파수 응답(frequency response)을 얻었다. 가진 가속도 신호와 ER insert plate 의 가속도 신호의 주파수 응답 함수는 FFT 분석기(HP 35665A)를 이용하여 측정하였다. 또한 STAR Modal software 를 이용하여 고유 주파수 및 모드 형상을 추출하였다.

### 5. 실험 결과 및 고찰

Hull 구조물의 ER insert 에 인가된 전기장의 크기와 여러 ER insert 종류에 따라 측정한 주파수 응답함수로부터 ER insert plate 의 공진주파수를 도출하였다. 여러 ER insert plate 의 형상에 따라 다른 결과를 얻을 수 있었다. Type 3,4 와 같은 형상보다는 Type 1,2 와 같이 ER 유체가 통합된 형상일수록 많은 진동 저감을 볼 수 있었으며 주파수 대역에 따라 댐핑 효과도 크게 나타났다. 모든 Type 의 공통점으로는 ER 유체의 삽입량이 많을수록 진동 저감의 효과도 컸다. 또한 전기장과 주파수 대역에 따라 모드 형상의 변화를 살펴 볼 수 있었다.

Fig. 6 은 Type 1 의 ER insert plate 의 주파수 응답이다. Type 1 의 ER insert plate 에 전기장을 부과했을 때 0~300Hz 사이의 모드는 댐핑의 증가로 인하여 진동이 감소하였으며 300~400Hz 사이의 모드는 과도 댐핑 현상으로 인하여 오히려 증가하는 결과가 나왔다. 또한 400~500Hz 사이의 모드는 공진 주파수가 전기장에 따라 증가하는 결과를 나타내었다. 이는 ER insert plate 에 함유되어 있는 ER 유체가 구조물의 강성과 댐핑을 전기장에 따라 변화시켜 시스템의 공진주파수를 이동시킨 것이다.

Fig. 7 은 전기장 인가에 따른 모드 형상을 나타내었다. 각 모드의 형상이 유사하게 나타났으며 전기장부하에 따라 진폭이 감소함을 볼수있다.

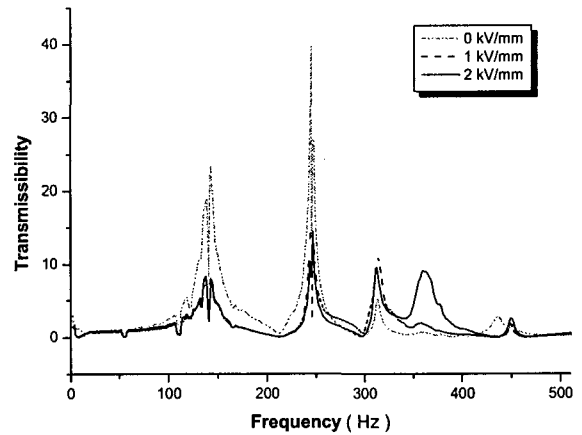


Fig 6. Frequency response [Type 1]

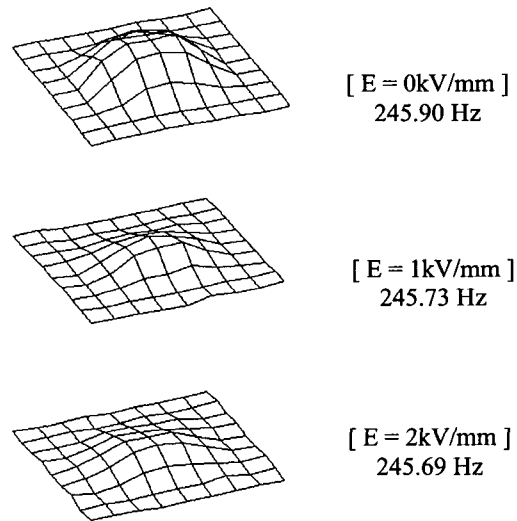


Fig 7. Mode shapes [Type 1]

Fig.8 은 Type 2 의 ER insert plate 의 주파수 응답이다. ER insert plate 에 전기장을 인가하였을 때 0~180Hz 와 400~500Hz 사이의 모드는 변화가 거의 나타나지 않았고 180~300Hz 의 모드는 댐핑의 증가로 인하여 진동이 감소하였으며 300~400Hz 사이의 모드는 과도 댐핑 현상으로 인하여 오히려 증가하는 결과가 나왔다. 또한 500Hz~550Hz 사이의 모드는 공진 주파수가 전기장에 따라 진동이 매우 감소하는 결과를 볼 수 있다. Fig. 8 은 500Hz 이후의 고유주파수 및 모드 형상이며 ER 유체의 댐핑 효과로 인하여 모드 형상의 변화를 볼 수 있다.

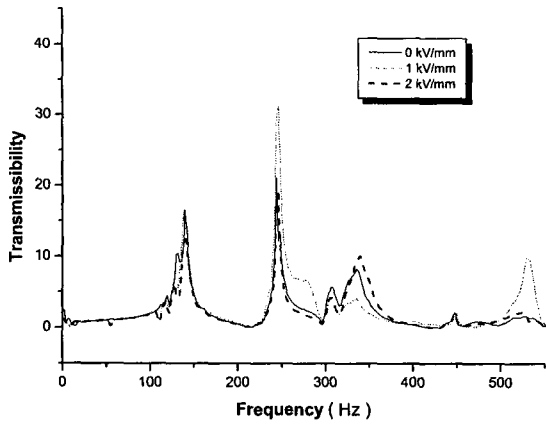


Fig 8. Frequency response [Type 2]

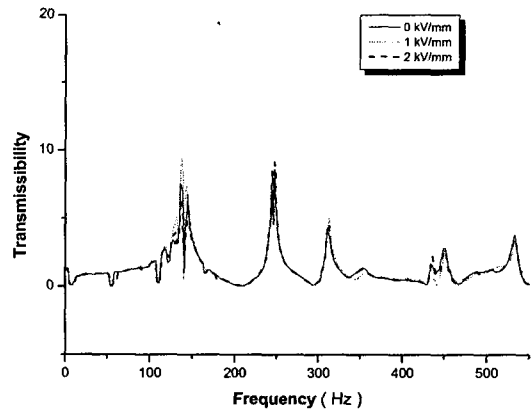


Fig 11. Frequency response [Type 4]

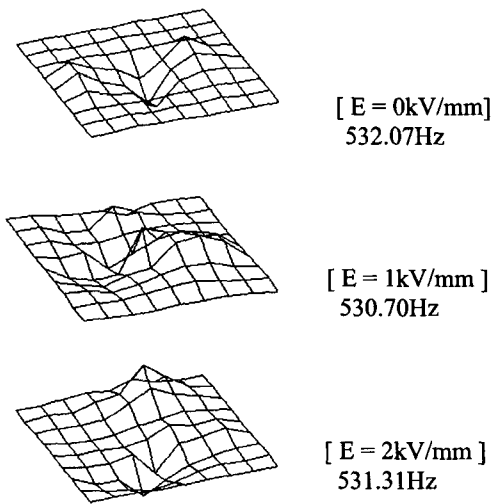


Fig 9. Mode shapes [Type 2]

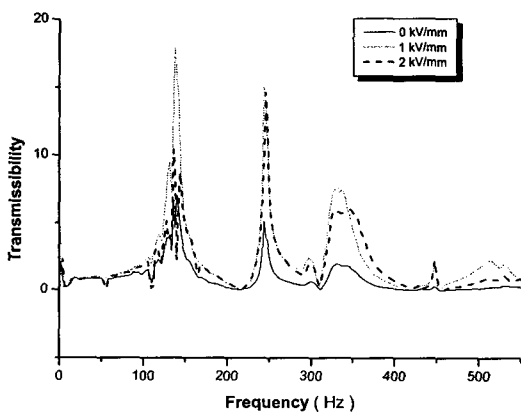


Fig 10. Frequency response [Type 3]

Fig. 10 은 ER insert plate Type 3 의 결과이다. 주 파수응답에 따른 진폭은 약간의 변화가 보이지만 변화가 매우 미비하며, Fig. 11 은 Type 4 의 결과인데 차이점의 거의 나타나지 않는다. 4 가지 형상 중 ER 유체 삽입의 면적이 적었던 이유로 전기장에 따른 가시적인 진동저감 효과를 얻을 수 없었다.

## 6. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 ER insert 를 적용한 hull mount 구조물의 진동 저감 성능을 실험적으로 고찰하였다. 여러 ER insert plate 종류의 실험을 통해 진동 저감의 효과를 살펴보았다. 전기장의 크기가 커질수록, ER 유체의 삽입량이 많을수록 좋은 진동 저감의 효과를 볼 수 있었다. 그 이유는 전기장 인가 시의 ER 유체는 대체로 점성이 높아지기 때문에 진동 저감의 효과가 증가하였다. 또한 전기장을 가했을 경우 모드 형상에도 영향을 주었다.

실험결과 최적의 ER insert plate 형상과 ER 유체의 삽입 면적을 찾기 어려웠다. 향후 유한요소 해석을 통하여 최적의 ER insert 형상을 찾고 효과적인 진동 저감 특성을 밝히고자 한다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-1999-00257) 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

- (1) 정정훈, 1998, “함정 탑재장비의 내충격 성능평가”, 한국소음진동공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 21~28
- (2) 김경수, 정정훈, 정배훈, 최중효, 1998. 11” 수중 폭발하중을 받는 수중구조물의 유체-구조 상호작용 해석”, 대한조선학회 '98 추계학술대회 논문집, 390-394
- (3) 강병우, 김재환, 최승복, 김경수, 2001. 8. "MR Insert 를 이용한 구조물의 응력과 저감", 한국소음진동공학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 71~76.
- (4) S. B. Choi, Y. K. Park, and J.D. Kim, "Vibration of Characteristics of a Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-Rheological Fluid", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 35. No. 9, pp 757-768, 1993.
- (5) Rudolph Szilard., 1974, "Theory and Analysis of Plates" PRENTICE-HALL, INC. Englewood Cliffs, New Jersey
- (6) The STAR System, "Theory and Application, Structural Measurement Systems", 1990